

# 山区高速公路高填方路基强夯施工工艺的质量控制与效果评价

杨秋月<sup>1</sup> 杜发绍<sup>2</sup>

1. 四川标新创异建筑工程有限公司 627350; 2. 四川宏峻博建筑工程有限公司 610065

**摘要:** 山区高速公路地形复杂、地质条件多变,高填方路基施工质量直接决定公路运营安全与耐久性。强夯工艺凭借加固效果显著、成本适中、适应性强的优势,广泛应用于山区高填方路基处理。本文结合山区地质特点,系统分析强夯施工核心流程与加固机理,构建“施工准备-过程管控-后期养护”全流程质量控制体系,建立多维度效果评价指标体系及综合评价方法,通过工程实例验证其有效性,为山区高速公路高填方路基强夯施工提供技术参考。

**关键词:** 山区高速公路;高填方路基;强夯施工;质量控制;效果评价

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

我国交通基础设施建设向山区纵深延伸,山区高速公路建设规模持续扩大。因地形起伏剧烈、沟壑纵横,高填方路基成为平缓地形、跨越沟谷的核心工程形式。但山区岩土体类型多样、含水率不均、孔隙率大,高填方路基易出现不均匀沉降、开裂、滑移等病害,严重威胁行车安全。

强夯工艺通过重锤自由下落的巨大冲击力夯实土体,可有效减小孔隙率、提升密实度与承载力,是解决山区高填方路基病害的关键技术。然而山区施工环境恶劣、空间受限,岩土体力学性质差异大,导致强夯质量控制难度高,参数不合理或管控不到位会大幅削弱加固效果。因此,研究强夯施工质量控制方法与科学评价体系,对保障工程质量、延长公路寿命、降低运维成本具有重要工程价值。

### 1.2 国内外研究现状

国外强夯技术研究始于20世纪60年代,法国工程师梅纳首次提出强夯法并应用于工程,欧美发达国家逐步形成成熟理论体系,开发出智能化施工与检测设备,实现精准管控。

国内强夯技术应用始于20世纪70年代末,已广泛用于交通、建筑领域。学者们在加固机理、质量控制等方面开展大量研究,揭示了岩土体密实化规律,提出参数化管控措施,但针对山区复杂地质的针对性研究不足;效果评价多采用单一指标,缺乏系统性体系,难以全面反映加固效果。

### 1.3 研究内容与技术路线

本文核心研究内容:分析强夯施工机理与山区施工难点;构建全流程质量控制体系;建立多维度效果评价体系与方法;通过工程实例验证可行性。

技术路线:梳理文献明确研究缺口→分析机理与难点、构建管控及评价体系→结合工程实例验证成果→总结优化形成结论。

## 2 山区高速公路高填方路基强夯施工工艺及加固机理

### 2.1 强夯施工工艺核心流程

山区强夯施工需结合地形地质优化流程,核心步骤为:施工准备→场地平整与排水→夯点布置→强夯施工→夯后平整与检测→路基填筑衔接。

施工准备需完成地质勘察、设备选型与试夯:勘察重点查明岩土体含水率、孔隙率、承载力等指标;设备选用机动性强、能量可调的强夯机,配套自动脱钩与精准定位系统。场地平整需清除腐殖土与软弱层,设置排水坡度及临时设施,避免雨水积聚。夯点采用正方形或梅花形布置,结合路基参数确定间距,确保覆盖全断面。施工遵循“先轻后重、先边后中、分层夯实”原则,严控落距、夯击次数与间歇时间,夯后清理浮土并碾压平整,检测合格后方可后续填筑。

### 2.2 强夯加固机理

强夯加固通过动力密实、动力固结、动力置换三种机理实现,效果取决于岩土体类型与力学性质。

动力密实适用于颗粒级配良好的砂土、碎石土路基,冲击力使土颗粒重新排列,孔隙率降低15%~30%,密实度与内摩擦角提升,承载力增强。动力固结适用于饱和黏性土路基,冲击力使土体产生裂隙形成排水通道,孔隙水排出后土体固结,有效应力提高,需严控能量与间歇时间防液化。动力置换适用于厚软弱土层路基,重锤将粗颗粒填料挤入软土形成复合地基,提升整体稳定性,适用于山区沟谷软土路基处理。

### 2.3 山区强夯施工难点分析

山区强夯核心难点:一是地形起伏大,施工空间

受限,设备移动定位难,易导致夯点偏差;二是岩土体性质差异大,参数设计需动态调整,难度较高;三是降雨集中,土体含水率波动大,影响加固效果且易诱发滑坡;四是高填方分层厚,层间易结合不良形成薄弱夹层;五是不良地质体(滑坡体、溶洞)易因强夯诱发灾害,需提前防护。

### 3 山区高速公路高填方路基强夯施工质量控制体系

结合山区施工难点,构建全流程质量控制体系,覆盖施工准备、过程管控、后期养护全环节,确保施工质量达标。

#### 3.1 施工准备阶段质量控制

##### 3.1.1 地质勘察质量控制

采用钻探、原位测试与室内试验相结合的方式勘察,沟谷、边坡等关键区域加密点位,勘察深度达路基底面以下2~3倍夯击影响深度。室内试验测定含水率、孔隙率、抗剪强度等指标,原位测试采用重型动力触探、平板载荷试验等验证承载力,勘察报告需明确不良地质体影响及处理建议,保障数据精准。

##### 3.1.2 设备与材料质量控制

强夯设备需匹配山区工况,夯锤质量、落距满足能量要求,采用圆形夯锤避免应力集中,起重机配套自动脱钩装置,进场前调试校验,不合格设备严禁使用。路基填料选用级配良好的碎石土、块石土,严禁使用软弱土,进场前检测最大粒径、含水率与含泥量,含水率控制在最佳值 $\pm 2\%$ ,超标时及时晾晒或洒水调整。

##### 3.1.3 试夯质量控制

试夯在代表性区域开展,面积不小于 $20\text{m}\times 20\text{m}$ ,结合勘察结果拟定夯锤质量( $10\sim 30\text{t}$ )、落距( $8\sim 20\text{m}$ )等参数,记录每击夯沉量与孔隙水压力变化,试夯后检测加固效果,优化确定施工参数,试夯报告经设计、监理审核后指导施工。

#### 3.2 施工过程质量控制

##### 3.2.1 场地与排水控制

场地平整后碾压密实,压实度 $\geq 90\%$ ,防止设备沉降导致夯点偏差。设置横向 $\geq 3\%$ 、纵向 $\geq 0.5\%$ 排水坡度,两侧布设临时排水沟,沟底坡度 $\geq 1\%$ ;饱和黏性土路基铺设 $10\sim 20\text{cm}$ 碎石垫层,加速孔隙水消散。

##### 3.2.2 夯点布置与定位控制

夯点间距为夯锤直径的2.5~3.5倍,正方形布置适用于地质均匀区域,梅花形布置适用于复杂地质区域。采用全站仪精准放线,标记桩定位偏差 $\leq 5\text{cm}$ ,施工中定期复核起重机站位与夯锤中心偏差,确保夯击精准。

##### 3.2.3 夯击参数控制

夯击能量按 $E=mgh$ 计算,碎石土路基采用

$2000\sim 4000\text{kN}\cdot\text{m}$ ,黏性土路基采用 $1500\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$ ,避免能量过大导致液化或过小影响加固深度。夯击次数以夯沉量稳定、地面无过量隆起为原则,每点6~12击,最后两击平均夯沉量 $\leq 5\text{cm}$ (碎石土)或 $8\text{cm}$ (黏性土),地质不均区域适当增加次数。

间歇时间根据孔隙水压力消散情况确定,饱和黏性土需2~4h,碎石土、砂土需1~2h,待孔隙水压力降至初始值50%以下方可复夯。分层夯实厚度3~6m,夯击影响深度达分层厚度1.5~2.0倍,上下层夯点错位 $\geq$ 夯锤直径1/2,增强层间结合力。

##### 3.2.4 特殊区域施工控制

边坡区域夯击能量适度降低,夯点距坡脚 $\geq 2\text{m}$ ,必要时设沙袋防护防失稳。不良地质区域需先预处理:滑坡体先抗滑加固,溶洞用碎石回填密实后再强夯,施工中加强沉降与位移监测,动态调整参数。

#### 3.3 后期养护与衔接质量控制

强夯完成后清理浮土,光轮压路机碾压2~3遍,压实度达标后养护 $\geq 7\text{d}$ ,养护期间禁止重型车辆通行,强化排水防护。强夯路基与后续填筑路基搭接长度 $\geq 1\text{m}$ ,衔接区域采用分层碾压+补充强夯结合方式,避免沉降差。

### 4 山区高速公路高填方路基强夯施工效果评价体系

采用“现场检测+理论分析”结合的综合评价方式,构建多维度指标体系,全面反映路基密实度、承载力与稳定性,为验收提供依据。

#### 4.1 评价指标体系构建

建立“物理性质-力学性能-稳定性”三级评价指标体系,各指标定义与标准如下:

##### 4.1.1 物理性质指标

孔隙率:碎石土 $\leq 25\%$ 、黏性土 $\leq 30\%$ ,采用环刀法或灌砂法检测;含水率:控制在最佳值 $\pm 2\%$ ,采用烘干法检测;压实度:下路堤 $\geq 95\%$ 、上路堤 $\geq 96\%$ 、路床 $\geq 97\%$ ,采用灌砂法或核子密度仪法检测。

##### 4.1.2 力学性能指标

地基承载力特征值:碎石土 $\geq 300\text{kPa}$ 、黏性土 $\geq 250\text{kPa}$ ,采用平板载荷试验检测;抗剪强度:碎石土内摩擦角 $\geq 35^\circ$ 、黏性土黏聚力 $\geq 25\text{kPa}$ ,采用直剪或三轴剪切试验检测;压缩模量 $\geq 20\text{MPa}$ ,采用室内压缩试验检测。

##### 4.1.3 稳定性指标

工后沉降量:高填方路基 $\leq 30\text{cm}$ ,不均匀沉降差 $\leq 0.5\%$ ,采用沉降观测仪监测;边坡稳定性系数 $\geq 1.3$ ,采用极限平衡法计算。

#### 4.2 效果评价方法

##### 4.2.1 现场检测方法

原位检测:平板载荷试验每 $1000\text{m}^2\geq 3$ 个点位,

测定承载力；重型动力触探评价碎石土密实度，标准贯入试验反映黏性土力学性质。室内试验：采集土样测试核心指标，对比强夯前后数据分析加固效果，严格遵循《公路土工试验规程》。沉降观测：网格法布设观测点，间距 $\leq 20\text{m}$ ，关键区域加密，观测周期覆盖施工期及工后2年，分析沉降规律。

#### 4.2.2 综合评价方法

采用层次分析法-模糊综合评价法：层次分析法确定指标权重，力学与稳定性指标占比 $\geq 60\%$ ，物理性质指标 $\leq 40\%$ ；模糊综合评价法建立评价矩阵，划分优秀（ $\geq 85$ 分）、良好（70~84分）、合格（60~69分）、不合格（ $<60$ 分）四级标准。不合格区域需补夯、换填处理，复检合格后方可验收。

### 5 工程实例分析

#### 5.1 工程概况

某山区高速公路K31+819~K34+819层0.5~1m腐殖土，下部为碎石土与粉质黏土互层，土体含水率18%~25%、孔隙率32%~38%，地基承载力120~180kPa，不满足设计要求。设计采用强夯工艺加固，夯击能量2500~3500kN·m，分层厚度4~5m，共分6层施工。

#### 5.2 强夯施工质量控制措施实施

施工准备：每50m加密勘察点位，选用25t夯锤、15m起升高度起重机，配套自动脱钩装置；K31+819~K34+819段试夯3组参数，确定最优方案：夯锤25t、落距14m（能量3500kN·m）、间距3.5m、8击/点、间歇2h。

施工过程：铺设15cm碎石垫层，设置3%横向坡度与临时排水沟；梅花形布置夯点，全站仪定位偏差 $\leq 5\text{cm}$ ，最后两击平均夯沉量 $\leq 5\text{cm}$ ；边坡区域能量降至3000kN·m，夯点距坡脚2.5m，设沙袋防护；孔隙水压力仪实时监测，保障间歇时间充足。后期养护：碾压3遍达标后养护7d，严禁重型车辆通行，强化排水巡查。

#### 5.3 强夯施工效果评价

##### 5.3.1 现场检测结果

物理指标：含水率20%~22%（最佳21%），孔隙率22%~26%，压实度96%~98%，均达标。力学指标：承载力320~380kPa，较前期提升167%~211%；重型动力触探锤击数平均28击，压缩模量22~28MPa，碎石土内摩擦角 $36^\circ \sim 40^\circ$ ，黏性土黏聚力28~32kPa，力学性能显著提升。

稳定性指标：施工期平均沉降12cm，工后1年累计18cm、2年22cm，均 $\leq 30\text{cm}$ ；不均匀沉降差0.3%，边坡稳定性系数 $1.45 \geq 1.3$ ，稳定性良好。

##### 5.3.2 综合评价结果

层次分析法确定权重：力学性能0.4、稳定性0.3、

物理性质0.3，模糊综合评价得88分，等级为优秀，验证了质量控制措施与评价体系的有效性。

#### 5.4 工程总结

本工程通过全流程质量控制与优化参数，有效解决山区复杂地质路基加固难题。实践表明，针对性设计强夯参数、严控施工关键环节、采用多维度评价方法，可显著提升高填方路基质量，保障运营安全。

### 6 结论与展望

#### 6.1 研究结论

1. 山区强夯施工难点源于地形、地质、含水率及空间限制，需结合三大加固机理优化施工流程。2. 构建的全流程质量控制体系，明确各环节要点，可有效提升施工质量、规避路基病害。3. 三级评价指标体系与层次分析-模糊综合评价法，能全面科学评价加固效果，为验收提供依据。4. 工程实例验证，本研究成果可显著提升路基承载力与稳定性，具备较强工程实用性。

#### 6.2 研究展望

未来可深化三方面研究：一是引入物联网技术，开发智能监测系统，实现施工参数自动调控；二是针对山区特殊地质，优化强夯工艺与防护措施；三是延长观测周期，研究路基长期性能衰减规律，完善长效评价体系。

#### 参考文献

- [1] JTG/T 3340-2018, 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [2] JTG 3430-2020, 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [3] 梅纳. 强夯法处理地基技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [4] 张三平, 李建国. 山区高填方路基强夯施工质量控制[J]. 公路交通科技, 2020, 37(S1): 123-128.
- [5] 王丽, 刘志强. 强夯法加固山区软土路基的效果评价[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊2): 201-204.
- [6] 陈明, 赵军. 层次分析法在强夯施工效果评价中的应用[J]. 公路, 2021, 66(8): 156-160.
- [7] 李小刚. 山区高速公路高填方路基病害防治与强夯技术应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2022.
- [8] 张磊, 王鹏. 强夯施工参数优化及质量控制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2567-2574.